

Les Sciences de l'Ingénieur

en Classes Préparatoires aux Grandes Écoles

Si vous êtes actuellement en terminale, il est temps de finaliser vos choix d'orientation pour vos études supérieures. Ce choix est important puisqu'il constitue le point de départ de votre trajectoire professionnelle.

Cet article vous propose un éclairage sur la formation scientifique enseignée en classes préparatoires et en écoles d'ingénieurs. Les Sciences de l'Ingénieur, une matière nouvelle et généralement peu connue des élèves de terminale, sont expliquées en détail. Des exemples vous illustreront les applications concrètes abordées en classes préparatoires.

I. Le métier d'ingénieur par l'exemple : Airbus A380

L'Europe a mis en service en 2007 l'avion de ligne le plus performant au monde : l'Airbus A380. Capable de transporter 555 passagers sur une distance de plus de 15 000 km ou encore une masse de 150 tonnes de fret, il dépasse son concurrent américain direct de plus de 30% en termes de capacité. Ces performances en cachent d'autres : une diminution de 13% de la consommation par passager et un niveau de bruit deux fois inférieur à son concurrent...



Au delà de ces chiffres

intéressant directement les compagnies aériennes, on trouve des performances techniques impressionnantes : une masse de 560 tonnes au décollage entraînée par 4 turbopropulseurs de 30 tonnes de poussée, une altitude de croisière de 12 000 m et une vitesse de plus de 1 000 km/h. Des chiffres dont on peine à prendre conscience tant ils sont éloignés de nos références habituelles. Ces performances sont atteintes grâce à un système extrêmement complexe et pointu.

La conception de ce type de système nécessite la coordination de 15 000 ingénieurs dans le monde, durant environ 2 ans, un temps très court au regard du projet. Et là encore des prouesses sont à assurer en termes d'organisation et d'efficacité. Le respect des spécifications, des délais et des coûts sur l'ensemble du projet requiert des compétences particulières de la part de chacun des acteurs. Ces compétences ont permis à Airbus de réaliser un avion innovant sans un seul prototype puisque le premier avion réalisé sort de la ligne de fabrication série et sera vendu et mis en service comme les suivants. Ainsi, plusieurs mois avant le premier essai en vol, 150 appareils sont déjà vendus !

L'art des ingénieurs est précisément d'assurer la réalisation de projets aussi complexes et ambitieux, de trouver des solutions optimales à des problématiques aux multiples contraintes puis de fabriquer ces solutions.

La performance des entreprises d'activités technologiques est directement liée aux compétences de ses ingénieurs. Les enjeux pour la France et l'Europe sont à la fois scientifiques et économiques : **le niveau de vie actuel ne pourra se maintenir dans le futur qu'en assurant une avance technologique suffisante dans les secteurs de pointe.** La France est bien positionnée dans différents secteurs (Aéronautique (A380), spatial (Ariane 5), nucléaire (EDF), transport ferroviaire (TGV) et routier (Renault, Peugeot)...) mais doit conquérir de nouveaux domaines comme les nanotechnologies, les nouvelles énergies, etc.

Si ces défis ambitieux laissent la société admirative des progrès scientifiques, ils peuvent aussi laisser les étudiants de terminale perplexes. Que de connaissances à acquérir avant d'être capable de participer à de tels projets. Serai-je capable de réussir dans une voie qui nécessite tant de compétences ? Si bien qu'aujourd'hui, beaucoup hésitent à s'engager dans une filière scientifique. Mais rassurez-vous, tout cela s'apprend !

II. Apprendre à être ingénieur

L'exemple d'Airbus souligne les compétences attendues de la part des ingénieurs : une bonne dose de créativité, de dynamisme, d'intelligence et des capacités à travailler en équipe, mais aussi des connaissances solides couplées à des capacités à utiliser ces connaissances sur les problèmes rencontrés. L'ingénieur ne doit pas se laisser dérouter par les systèmes complexes et multidisciplinaires qui lui demandent une bonne culture générale scientifique.

La formation initiale des ingénieurs s'opère au cours de 5 années après le bac. Ces années se décomposent, pour les plus grandes écoles, en deux années de classes préparatoires et trois années d'école d'ingénieurs.

- Les classes préparatoires vont principalement **développer les méthodes de travail individuelles** chez le futur ingénieur : la rigueur scientifique, la démarche de raisonnement et l'efficacité. Les enseignements apportent, en outre, les bases mathématiques et scientifiques permettant d'appréhender les enseignements en école d'ingénieurs.
- Les écoles d'ingénieurs **développent les méthodes de travail en équipe**, apportent des compléments scientifiques et des compétences plus professionnalisantes comme la gestion de projets, le management, etc.

Alors est-il difficile de devenir ingénieur ? Eh bien non, les écoles offrent beaucoup de places et vous apportent les compétences nécessaires à votre carrière. Les débouchés en sortie d'école sont vastes et **il y a finalement très peu de situations d'échec entre la terminale et le premier emploi.**

Les sciences ne sont pas difficiles pour peu que l'on vous ait appris à décoder les systèmes complexes pour les appréhender simplement, à participer puis gérer les projets.

Par contre, il faut s'attendre à fournir des efforts au cours de la scolarité. Tout comme un sportif se préparant aux compétitions, c'est dans l'effort que l'on améliore ses capacités personnelles et que l'on devient performant. La clé de la réussite dans la filière scientifique est tout d'abord un goût prononcé pour les sciences et les technologies.

Il vous faudra par ailleurs une bonne dose de volonté et d'ambition vis à vis de votre avenir, pour prendre conscience que les fruits des efforts réalisés en classes préparatoires seront récoltés au cours des dix années qui suivront.

III. Les Sciences de l'Ingénieur en classes préparatoires

Les enseignements de Sciences de l'Ingénieur, comme ceux de mathématiques et de sciences physiques, visent en premier lieu à transmettre des capacités d'analyse et de raisonnement et en second lieu à apporter des connaissances proprement dites. Chaque matière apporte des éléments spécifiques dans la formation globale des étudiants. L'apport des sciences de l'ingénieur sur le plan des capacités personnelles peut se structurer en deux volets :

- développer des capacités d'analyse de **systèmes complexes**,
- apprendre à se forger des **compétences** à partir de connaissances théoriques.

Ces deux formulations nécessitent quelques explications pour en apprécier pleinement le sens.

A. Systèmes complexes

Un **système complexe** est un ensemble d'éléments simples dont les inter-relations sont telles qu'il devient difficile d'en comprendre le fonctionnement. Pour donner un exemple, chacun s'est déjà trouvé perplexe en ouvrant le capot de sa voiture devant l'enchevêtrement de composants qui assurent la propulsion du véhicule. S'il est facile de reconnaître des tuyaux, une batterie, des capots et autres pièces qui sont des éléments simples, il est beaucoup plus difficile d'appréhender le fonctionnement global du système.

S'il existe beaucoup de systèmes complexes très différents, nous nous limitons en classes préparatoires aux systèmes créés par l'homme en vue de réaliser une tâche précise. Ces systèmes, que nous appelons **systèmes industriels**, représentent le principal domaine de travail des ingénieurs. Qu'il s'agisse d'un avion A380, d'un téléphone portable, d'un ordinateur, d'un satellite, d'un réseau Internet, d'un scanner d'imagerie médicale, ce sont tous des systèmes complexes réalisés par l'homme en vue d'accomplir une tâche précise : des systèmes industriels.

La difficulté d'analyse et de conception de systèmes complexes provient tout d'abord de la difficulté de compréhension des inter-relations entre les composants. Le cerveau a besoin **d'outils et de méthodes** pour structurer la démarche d'analyse et acquérir une dextérité de réflexion sur les systèmes. Par ailleurs, un système industriel est souvent **pluridisciplinaire**.

Dans le cas de l'A380, le comportement en vol de l'avion doit nécessairement être couplé au comportement du système de commande des gouvernes pour assurer un fonctionnement correct en pilotage automatique. Travailler simultanément sur plusieurs champs disciplinaires (ici la mécanique du vol et l'asservissement des processus) pour répondre à un problème technique unique requiert des méthodes particulières. Enfin, la conception d'un système industriel est souvent un problème multi-contraintes et multi-solutions, ce qui s'oppose aux problèmes mathématiques classiques présentant une solution unique à un problème bien posé.

Le problème est multi-contraintes car un système industriel doit répondre à un grand nombre de spécifications différentes, souvent contradictoires. Il y a généralement beaucoup de solutions, qui réalisent différents compromis entre les spécifications. L'exemple des véhicules automobiles est frappant : un constructeur doit concevoir un produit qui satisfait à un grand nombre de contraintes de la part du client en terme de vitesse, de confort, d'aspect visuel, de bruit, de volume, de maniabilité, etc. Derrière chacune de ces catégories se cachent une multitude de spécifications chiffrées. Chaque constructeur automobile propose une solution différente qui réalise un compromis entre ces critères. La recherche d'une solution réalisant un compromis plutôt que de trouver la solution unique du problème n'est pas une démarche naturelle pour les étudiants, alors qu'il s'agit de la démarche quotidienne de l'ingénieur.

B. Compétences

Une **compétence** est la capacité à utiliser diverses connaissances théoriques pour résoudre des problèmes réels ou concevoir des systèmes réels. Une personne cultivée (dans un sens scientifique) est une personne ayant beaucoup de savoirs théoriques intellectuels. Une personne compétente est une personne sachant allier connaissances et pratique, capable de mettre en œuvre des connaissances théoriques sur des cas concrets. Il est évident qu'une entreprise a besoin d'ingénieurs compétents et pas seulement cultivés !

Les étudiants de terminale ont généralement mesuré cette différence dans le cas des langues vivantes. Une personne ayant appris l'anglais durant 7 années sans aller une seule fois dans un pays anglophone sera, face à un anglais en visite en France, beaucoup moins à l'aise qu'une personne ayant deux années d'apprentissage de l'anglais suivies d'une année en immersion dans le pays, soit 3 années de formation.

L'apprentissage de connaissances en cours ne fournit pas aux étudiants la capacité à mettre ces connaissances en œuvre sur des cas réels. Après l'acquisition des connaissances, il y a un second travail d'apprentissage pratique à réaliser pour convertir ces connaissances en compétences. Cette seconde phase est un travail beaucoup plus personnel pour chaque étudiant que la première. Il s'agit de confronter ses propres représentations mentales des savoirs aux phénomènes réels, afin d'en cerner les limites. Apprendre ce passage de la théorie à la pratique sur quelques connaissances permet ensuite de le réitérer dans d'autres domaines lorsque de nouveaux champs d'investigation sont abordés, dans la suite du cursus de formation ou dans le métier d'ingénieur.

Les enseignements de Sciences de l'Ingénieur proposent par conséquent aux étudiants d'apprendre un petit nombre de connaissances théoriques, fondamentales pour l'étude des systèmes industriels, et de les mettre en œuvre sur des systèmes complexes réels en travaux pratiques. Les horaires des enseignements sont fortement orientés vers la confrontation des connaissances au réel.

IV. Les thèmes abordés en Sciences de l'Ingénieur

Les connaissances théoriques acquises en SI représentent des savoirs essentiels de la culture scientifique des ingénieurs. Ces points sont, bien entendu, approfondis en école d'ingénieur. Ils se décomposent en quatre thèmes :

- l'étude système,
- la mécanique des systèmes de solides,
- l'asservissement des processus,
- la commande logique combinatoire et séquentielle.

Nous allons illustrer chacun des thèmes sur des exemples industriels. Ces exemples sont tous tirés de sujets de concours récents et sont donc représentatifs des exemples abordés en cours ainsi que des compétences attendues de la part des étudiants à l'issue des deux années.

A. L'étude système

Le chapitre d'étude système vise à donner des outils et méthodes de décomposition et d'analyse des systèmes complexes. Il s'agit principalement d'identifier la fonction globale du système industriel (à quoi il sert) ainsi que les fonctions des sous-systèmes participant à la réalisation de la fonction globale.

Le système industriel, réduit aux tâches et sous-tâches réalisées, devient compréhensible et il est alors possible de définir les interactions entre composants et de caractériser les performances du système.

1) Exemple : Optique adaptative (concours Mines-Ponts 2001).

L'optique adaptative du Very Large Telescope (VLT) est un système permettant de corriger les perturbations de l'image d'un astre lors du passage de la lumière à travers l'atmosphère. En effet, les mouvements des masses d'air et les gradients de température déforment les surfaces d'ondes lumineuses. Ces déformations évoluent au cours du temps. Or, pour obtenir une image précise et nette, il faut recevoir à travers le télescope une grande quantité de lumière, ce qui ne peut se faire qu'en soumettant le récepteur (pellicule ou caméra) aux rayons lumineux durant un temps relativement long.

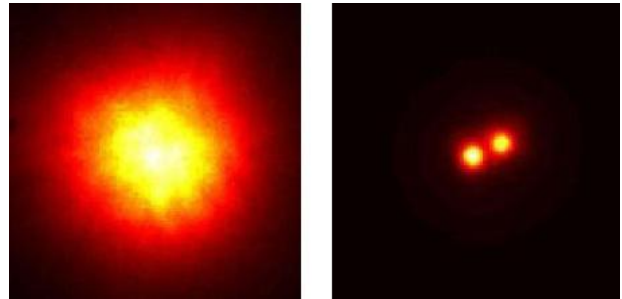


Image d'une étoile double sans et avec correction

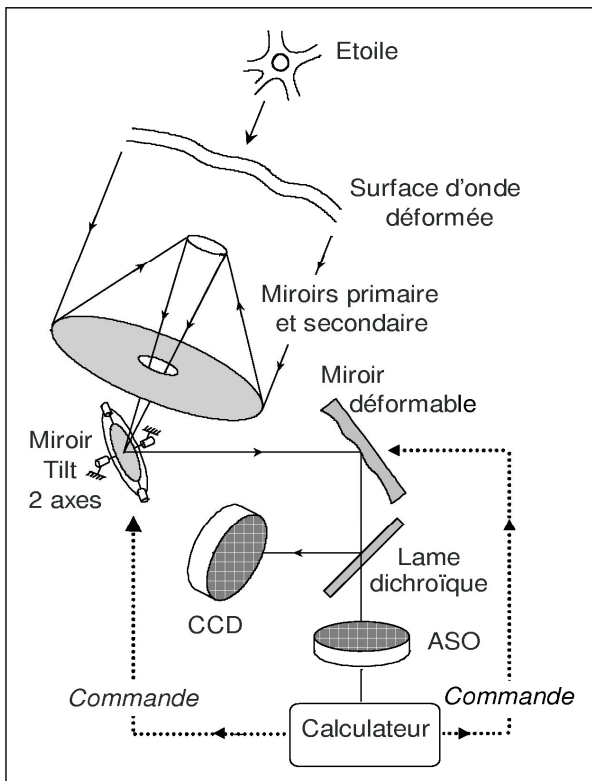
Mais si l'image reçue se déforme au cours du temps, l'image perçue par le récepteur devient floue. Une solution très coûteuse est de placer un télescope dans l'espace (Hubble). Une solution nettement plus

abordable est le système d'optique adaptative. Les performances sont comparables car si la correction n'est pas parfaite, elle est compensée par la taille nettement plus importante du télescope.

L'analyse par l'étude système consiste en premier lieu à isoler les sous-systèmes et définir leurs fonctions : le télescope qui réceptionne l'image déformée, le correcteur de tilt qui corrige le déplacement de l'image, le miroir déformable qui corrige la déformation de l'image, un capteur CCD qui enregistre les déformations, une caméra enregistrant l'image corrigée, une lentille séparatrice renvoyant l'image vers les deux capteurs et un système de commande qui détermine les consignes de correction à partir des déformations observées.

Chacun des sous-systèmes peut être détaillé comme par exemple le correcteur de tilt, composé de moteur agissant sur un système mécanique articulé qui lui même déplace un miroir plan en rotation et de capteurs mesurant les rotations du miroir afin que le système de commande puisse éventuellement corriger les consignes moteurs.

Les flux d'informations, d'énergie ou de matière peuvent ensuite être identifiés entre chaque composant (flux d'informations lumineuse, d'information de consigne, d'énergie électrique et mécanique, etc.).



Les outils graphiques d'étude système sont élémentaires et ne nécessitent qu'une formation rapide en début de première année. La mise en œuvre sur les systèmes réels est nettement plus longue à maîtriser. Ces outils sont utilisés tout au long de l'année sur les exemples vus en TD et TP lorsqu'il faut décoder le fonctionnement du système.

B. La mécanique des systèmes de solides

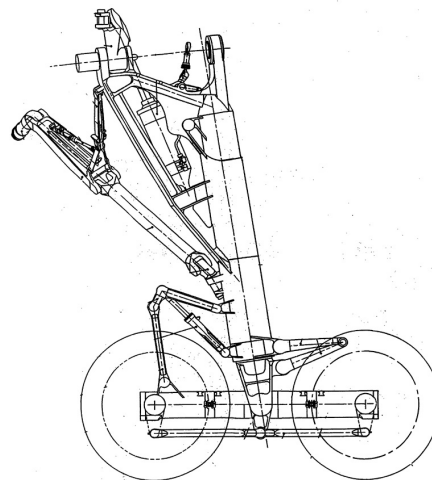
Le chapitre de mécanique des systèmes de solides complète les éléments de mécanique du point matériel vus en sciences physiques en pré-bac ainsi qu'en classes préparatoires. La mécanique du point est insuffisante pour l'ingénieur dans la plupart des problèmes technologiques rencontrés. Comment par exemple appréhender le déploiement d'un train d'atterrissage d'Airbus A320 par la mécanique du point ?

L'étude d'un tel système industriel part d'une constatation : chaque pièce est très peu déformable et un certain nombre d'articulations définissent le mouvement d'ensemble. Il est donc possible d'étudier le mouvement avec une bonne précision en supposant les pièces parfaitement rigides, reliées entre elles par des liaisons autorisant certains mouvements (certaines rotations ou translations).



L'étude du mouvement n'est pas le seul point intéressant l'ingénieur. Il faut aussi pouvoir vérifier la bonne tenue du train lorsqu'il est soumis aux efforts de la piste sur les roues au moment de l'atterrissage. Les hypothèses formulées précédemment permettent de déterminer les actions mécaniques transmises par chacune des liaisons et donc de prévoir si les liaisons seront capables de résister aux sollicitations.

L'étude du mouvement et des actions mécaniques est faite en première année. Le couplage entre mouvement et efforts (principe fondamental de la dynamique) est étudié en seconde année. L'exemple précédent (optique adaptative) comportait déjà, au niveau du correcteur de tilt, des applications de dynamique des solides. Nous allons proposer une nouvelle illustration.



Exemple : Simulateur de vol (Concours Commun Polytechnique 2003)

Un simulateur de vol est un système permettant aux pilotes des avions de ligne de s'entraîner et de se former aux situations d'urgence. Une cabine dans laquelle le pilote prend place reproduit un cockpit d'avion. Des écrans remplacent les fenêtres et reproduisent la vue extérieure depuis le cockpit. Toutes les commandes sont présentes dans le cockpit et un ensemble de vérins déplacent la cabine pour reproduire la sensation du mouvement de l'avion. Une séquence de vol est proposée au pilote, où celui-ci doit généralement faire face à un incident imprévu (panne d'un turbopropulseur, défaillance d'un appareillage du cockpit, etc.).

La séquence de vol et les commandes du pilote permettent de déterminer les accélérations à imposer à la cabine. Chaque vérin est alors actionné afin d'imposer ces valeurs d'accélération. La mécanique du solide permet de calculer les profils de vitesse à imposer au vérin pour assurer un mouvement particulier de la cabine ainsi que de déterminer les efforts subis par chaque vérin. Ces informations sont utiles pour concevoir le logiciel de commande des vérins et dimensionner chaque vérin. Dans cet exemple, il y a un couplage évident entre le mouvement et les efforts subis par chaque vérin.



C. L'asservissement des processus

Pour beaucoup de systèmes industriels, la tâche à accomplir par le système vise à maîtriser un processus que l'homme ne peut maîtriser seul. Prenons l'exemple de l'A380 : l'homme ne peut contrôler le mouvement d'un tel avion, représentant une telle énergie, à l'aide de ses seuls efforts musculaires. Il ne souhaite pas non plus piloter l'avion durant les dizaines d'heures de vol et préfère laisser cette tâche à un pilote automatique. Aujourd'hui les avions de ligne savent décoller, suivre un plan de vol et atterrir de façon automatique.

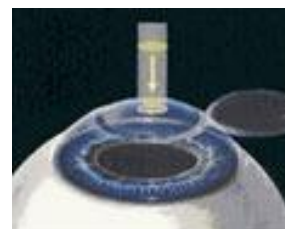
Le système automatisé peut se décomposer en un processus (l'avion) et une partie commande (le pilote automatique). L'homme indique au système les consignes de vol et le pilote automatique asservie le processus pour respecter les consignes.

Les deux exemples précédents (optique adaptative et simulateur de vol) sont déjà des systèmes asservis. Nous allons proposer une nouvelle illustration.

Exemple : Correction de la vue par Lasik (Concours École Normale Supérieure de Cachan - École Polytechnique 2004)

La correction de la vue fut longtemps obtenue par des lunettes de vue, adaptant l'image à l'œil malvoyant. Les verres de contact sont ensuite venus compléter les solutions de correction. Désormais, une opération chirurgicale par laser permet de corriger définitivement la vue par rectification de la courbure de la cornée.

L'opération consiste à envoyer des tirs au laser sur la cornée afin de brûler un fragment de cornée et, par suite de centaines de tirs parfaitement localisés, rectifier la courbure de la cornée. Bien que l'œil soit endormi, il est impossible d'annuler totalement ses mouvements. Le laser doit cependant tirer exactement aux points prévus par le logiciel de rectification pour assurer une qualité optimale de l'opération. Un asservissement du laser



est réalisé en mesurant le mouvement de l'œil et en corrigeant le déplacement du laser pour suivre en permanence le mouvement de l'œil.

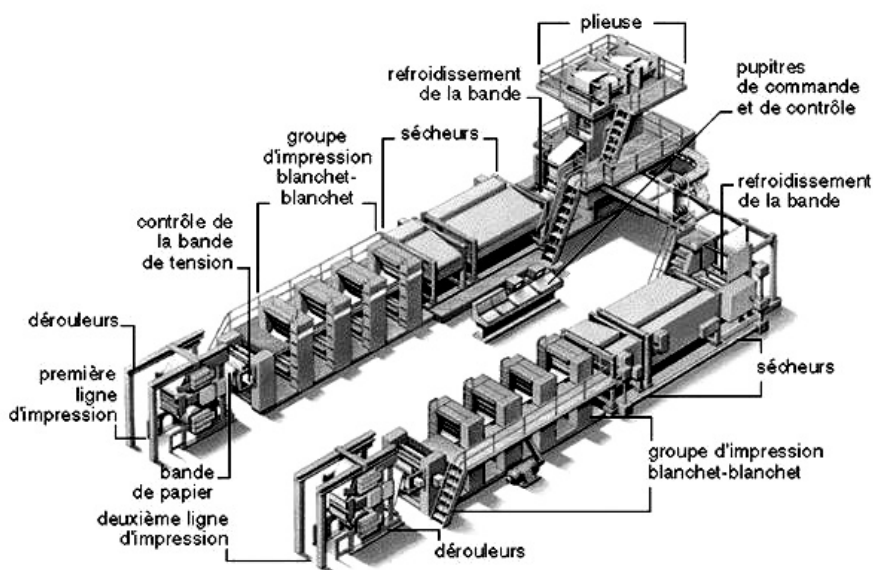
D. La commande logique combinatoire et séquentielle

Ce chapitre traité en première année est déjà abordé en pré-bac en option SI. Il vise à mieux comprendre les systèmes de commande caractérisés par des entrées-sorties de type vrai ou faux, ou encore 1 ou 0. Les ordinateurs par exemple fonctionnent sur des informations codées sous forme de 0 et de 1. Les aspects traités en classes préparatoires concernent les systèmes relativement simples comme la commande d'un monnayeur d'autoroute permettant de vérifier la somme versée et de rendre la monnaie ou la commande d'un ascenseur. Mais ce type de commande est aussi présent dans des systèmes comme l'A380. Les procédures de vérifications de bon fonctionnement sont basées sur des commandes vrai ou faux. De même, la procédure de tir au laser du système Lasik est définie par une commande logique. Nous allons proposer une nouvelle illustration.

Exemple : Commande d'urgence en cas de rupture du papier dans une ligne d'imprimerie (Concours Centrale-Supélec 2003).

L'imprimerie moderne consiste à dérouler une bobine de papier de plusieurs centaines de mètres vers des tambours imprimant le papier puis des cisailles découpant les pages et enfin des systèmes d'assemblage des pages. Or le papier est très fin (environ 0,06 mm) et ne peut subir des efforts de tension importants malgré une vitesse d'environ 20km/h dans des tambours. Une rupture du papier suivie d'un bourrage dans la ligne peut devenir catastrophique pour tout le matériel si l'ensemble n'est pas immédiatement arrêté.

Un système automatique est donc prévu pour détecter la rupture papier et le lancer immédiatement différentes procédures d'arrêt des machines de la ligne d'imprimerie. Ce système de commande reçoit des informations de type 0 ou 1 de la part des capteurs (bouton de marche, capteur de rupture papier, détecteur de position de la bande, phase de fonctionnement de la ligne d'imprimerie, etc.) et transmet des ordres de type 0 ou 1 (marche arrêt du module de déroulement de la bobine, activation d'une soufflerie évacuant le papier rompu, arrêt des tambours après passage de la bande, etc.).



V. Conclusions

Vous orienter aujourd'hui vers une filière scientifique, c'est embrasser une formation puis une carrière riches en défis, travailler sur des projets passionnants et aider la société à progresser.

Les classes préparatoires aux grandes écoles et les écoles d'ingénieurs vous proposent une formation d'excellence dans cette voie, en vous apportant toutes les compétences nécessaires. Bien que le rythme soit soutenu, l'encadrement permet un nombre d'échec particulièrement faible.

A la sortie des écoles d'ingénieurs, les débouchés qui s'offriront à vous seront à la fois diversifiés et de grande qualité.

Les Sciences de l'Ingénieur participent dès les classes préparatoires à la formation de futurs ingénieurs en apportant des compétences spécifiques. La filière PTSI, propose un parcours particulièrement bien adapté au cursus scientifique en alliant connaissances théoriques et mise en œuvre pratique et concrète.

La PTSI s'adresse spécialement à vous si vous avez envie de découvrir les sciences et technologies et de vous passionner pour elles, si vous avez envie d'être créatifs et si vous voulez non seulement comprendre les concepts théoriques mais aussi les mettre à l'épreuve des systèmes réels.

Le choix que vous faites en terminale est un choix de carrière professionnelle. Les classes préparatoires aux grandes écoles peuvent vous emporter vers des parcours enrichissants et sûrs, dans les filières qui vous intéresseront.